

Н. Н. ДЕРГУНОВ, В. И. ФРОЛОВ, Н. Е. РИПП, В. П. СОСЕДОВ,
В. Н. БАРАБАНОВ

УПРОЧНЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА ПРИ ТРЕНИРОВКЕ

(Представлено академиком Ю. Н. Работновым 11 VII 1972)

Упрочнение под действием переменных напряжений на металлах сопровождается увеличением твердости, уменьшением гистерезисной петли, увеличением пределов упругости и текучести (¹).

Нами было обнаружено упрочнение при испытании на усталость углеродного волокна, которое имеет хрупкий характер разрушения. Исследования проводились на углеродном волокне, полученном термообработкой полиакрилонитрильного волокна. Структура и свойства такого волокна подробно описаны в работах (²⁻⁴).

Оценка разброса свойств жгута показала, что коэффициент вариации для предела прочности σ_b и диаметра d между филаментами составляет 22 и 10% соответственно, а по длине филамента — 15,5 и 4,5%.

Отбор однородных образцов был сделан по результатам испытаний филаментов, взятых из одного сечения жгута. От каждого 200-миллиметрового филамента отделяли пять образцов с базой 10 мм (два с одного конца, три с другого). На основании испытания этих образцов на растяжение были отобраны 18 филаментов длиной 100 мм, у которых отклонения σ_b и d не превышали соответственно 10 и 5% от среднего значения для всех испытанных образцов.

Испытания проводили на машине «Инстрон» типа TM-SM, при этом волокно заклеивалось клеем БФ-2 в бумажные рамки. Скорость перемещения траверсы при тренировке составляла 10 мм/мин, а при испытании на прочность 1 мм/мин. Диаметр измеряли по всей длине волокна с интервалом 2,5 мм на оптическом твердометре ПМТ-3 с насадкой МОВ (цена деления 0,3 μ) в отраженном свете с использованием синего светофильтра. Тренировку проводили на 100-миллиметровых филаментах, после чего из них изготавливали образцы длиной 10 мм для испытания на прочность.

На рис. 1а показано влияние максимального напряжения цикла $\sigma_{\max}$ на относительное изменение предела прочности при постоянном числе циклов $N_0 = 1000$. При этом $\sigma_{\max}$ составляло 0,4; 0,6 и 0,8 от σ_b , а минимальное напряжение цикла $\sigma_{\min} = 0,05 \sigma_b$. На рис. 1б показано влияние числа циклов на относительное изменение предела прочности (при $\sigma_{\max} = 0,6 \sigma_b$ и $\sigma_{\min} = 0,05 \sigma_b$).

Из приведенных результатов видно, что в результате тренировки происходит упрочнение волокна. Максимальный эффект наблюдается при $\sigma_{\max} = 0,6 \sigma_b$ и $N_0 = 1000$. Увеличение как числа циклов до 10 000, так и максимального напряжения цикла до $0,8 \sigma_b$ приводит к снижению предела прочности до первоначального значения. В настоящее время методами рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии установлено, что углеродное волокно состоит из искривленных графитоподобных слоев шириной 30–100 Å, имеющих протяженность более 1000 Å (^{4, 5}).

Определенное число (10–15) таких слоев образуют фибриллы, которые имеют предпочтительную ориентацию параллельно оси волокна. Средний угол разориентации базисных плоскостей относительно оси волокна составляет около 20° для исследованного вида волокна.

Углеродное волокно обладает значительной пористостью $\approx 20\%$. Поры по длине имеют протяженность $>200-300 \text{ \AA}$, а по ширине $10-20 \text{ \AA}$, причем их предпочтительная ориентация повторяет ориентацию фибрилл.

Сравнение прочности волокон с теоретической, оценка которой была сделана в работе ⁽⁶⁾, показывает, что они различаются почти на два порядка. Такая низкая прочность является следствием высокой пористости и искривленности слоев. Необходимо отметить также, что в результате выпрямления фибрилл при нагружении на начальном участке кривой деформирования наблюдается рост модуля упругости.

Несмотря на то, что углеродное волокно имеет хрупкий характер разрушения, рядом авторов ⁽⁶⁻⁸⁾ было установлено, что процессу разрушения

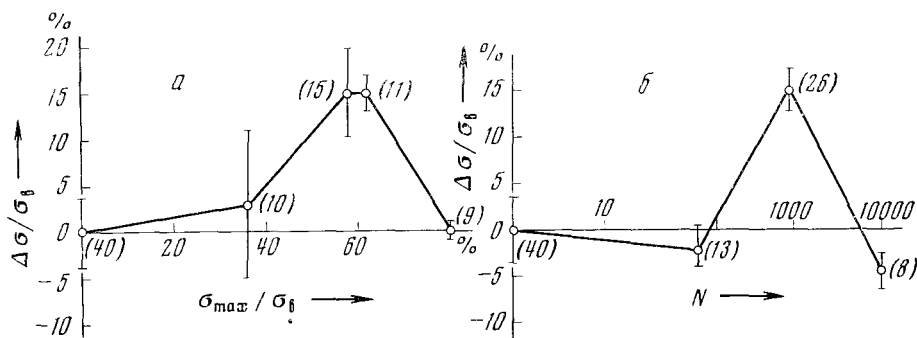


Рис. 1. Зависимость относительного изменения предела прочности углеродного волокна от максимального напряжения цикла $\sigma_{\max}$ при постоянном числе циклов $N_0 = 1000$ (а) и от числа циклов N при постоянном максимальном напряжении цикла $\sigma_{\max} = 0,6 \sigma_{\text{в}}$ (б). В скобках указано число испытанных образцов

предшествует локальная пластическая деформация. Упрочнение при действии циклических напряжений, которое было выявлено в настоящей работе, также можно связать с локальной пластической деформацией, приводящей к релаксации напряжений у концентраторов. Помимо этого, плоскости скольжения образуют новые границы, и, таким образом, происходит дробление или измельчение фибрилл, приводящее к повышению прочности.

Однако наряду с факторами, приводящими к упрочнению в результате действия циклических напряжений, протекают процессы разупрочнения, поскольку с увеличением числа циклов и увеличением максимального напряжения цикла эффект упрочнения уменьшается. Это обстоятельство, по-видимому, связано с ростом трещин и пор.

Поступило
18 V 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Кеннеди, Ползучесть и усталость в металлах, М., 1965. ² D. V. Bادمi, I. C. Joiner, G. A. Jones, Nature, **215**, 386 (1967). ³ D. I. Johnson, C. N. Tyson, Brit. J. Appl. Phys., **2**, 787 (1969). ⁴ A. Fourdeux, R. Perret, W. Ruland, Intern. Conf. on Carbon Fibres, their Composites and Application, London, 1971, paper № 9. ⁵ I. A. Hugo, V. A. Phillips, B. W. Roberts, Nature, **226**, 144 (1970). ⁶ W. S. Williams, D. A. Steffens, R. Bacon, J. Appl. Phys., **41**, 4893 (1970). ⁷ R. Bacon, W. H. Smith, Proc. II Conf. Carbon and Graphite, London, 1965, p. 203. ⁸ W. R. Jones, I. W. Johnson, Carbon, **9**, 645 (1971).